

## 二重翼列波力タービンの開発 (定常流れ特性)

吉田 光弘<sup>\*1</sup>, 奥村 哲也<sup>\*1</sup>, 林 秀千人<sup>\*1</sup>, 瀬戸口俊明<sup>\*2</sup>

### Development of double cascade impeller for wave power generator (Aerodynamic characteristics at steady flow condition)

Mitsuhiro YOSHIDA<sup>\*1</sup>, Tetsuya OKUMURA<sup>\*1</sup>, Hidechito HAYASHI<sup>\*1</sup>, Toshiaki SETOGUCHI<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Nagasaki University  
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki-shi, Nagasaki-Pref, 852-8521 Japan

<sup>\*2</sup> Institute of ocean energy, Saga University  
1-Honjo machi, Saga-shi, Saga, Japan, 840-8502

It is proposed the new type turbine for OWC that consists of Wells and Impulse turbines. Wells and Impulse rotors are set parallel for high efficiency and starting characteristics. This paper presents the results of the numerical simulations in steady flow condition. The maximum efficiency is obtained at the low flow coefficient that is fitted to the high speed operation. The variation of efficiency with flow coefficient is small for large flow coefficient that advantages to the starting characteristics. The split duct is designed to fit the flow coefficient at the maximum efficiencies of Wells and Impulse turbines. It is pointed out that the geometry of the split duct is important to improve the turbine performance.

**Key Words** : Wells Turbine, Impulse Turbine, Wave Power Generation, Wave Energy, Oscillating Water Column(OWC)

## 1. 緒 言

近年わが国や欧州を中心に、海洋エネルギー利用技術の一種である振動水柱型(OWC: Oscillating Water Column)波力発電について多くの研究がされている。この発電は波浪エネルギーを往復空気流に変換し、その往復空気流中を常に一方向回転をする特殊なタービンを用いて電気エネルギーに変換する。その中で主流であるウェルズタービン<sup>(1)~(8)</sup>と、近年注目されている衝動タービン<sup>(9)~(12)</sup>がある。

ウェルズタービンは原理上、低流量時に大きい動力が得られる高速型の特性がある。しかしながら、強度、保守、および騒音が問題視されている。また、流れの状態や高流量係数時にはタービンが失速しエネルギー効率がよくない状態に至ることがある。このことから、流量変動に対しては安定せず起動特性が低い欠点を有する。一方、衝動タービンはウェルズタービンと比べ高いトルクと高流量係数時に広範囲で高い効率が得られ、起動特性も優れている。しかし、低流量係数時では効率が急激に低くなり、最大効率はウェルズタービンよりも劣る性能である<sup>(13)</sup>。

これらのタービン特性を踏まえて、ウェルズタービンの高流量係数時の性能改善のため、ダクト形状を変化させる試みもなされている<sup>(7)</sup>。しかしながら、ウェルズタービンの欠点である起動性や流量変動に対する性能の改善には、まだ十分に対応がなされる状況にはない。これは、再生可能エネルギーを用いた発電方法としては大きな欠点となる。

そこで著者らは両タービンをひとつのタービン中に組み合わせ一体化して、起動性と効率を考慮したシンプルな構造の新しい二重翼列波力タービンを提案する。本研究では、数値シミュレーションにより定常流における特性を、ウェルズタービン単体、衝動タービン単体と比較し評価した。

---

原稿受付 2016 年 07 月 29 日

<sup>\*1</sup> 長崎大学機械工学 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

<sup>\*2</sup> 佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町一番地)

E-mail of corresponding author: [hidechito@nagasaki-u.ac.jp](mailto:hidechito@nagasaki-u.ac.jp)

## 2. 二重翼列タービンの形状と計算条件

### 2・1 二重翼列タービンの概要

二重翼列波力タービンは、ウェルズタービンと衝動タービンを組み合わせたものである。過去の研究で用いられていたそれぞれのタービンの形状<sup>(1)(4)</sup>をもとに、二重翼列波力タービンを製作した。文献を参考に、ハブ比をおよそ0.7に設定し、ウェルズタービンは、外径 $d_0$ が300 mm、内径 $d_i$ が201 mm、羽根はNACA0021で $N=6$ 枚翼からできている。一方、低速型である衝動タービンは、ウェルズタービンの内側に設置した。外径がウェルズタービンの内径 $d_i$ とほぼ同じで200 mm、ハブ直径 $d_h$ は140 mmである。羽根枚数は30枚で、二次元形状となっている。案内羽根は出口角度が $60^\circ$ で羽根枚数 $N$ が26枚である。タービン前後には流入する流速を調節するため、ウェルズタービンと衝動タービンの仕切りを設けている。この仕切りは、ウェルズタービンと衝動タービンの最高効率が一致するように流量および流速の配分を考慮して設定した。

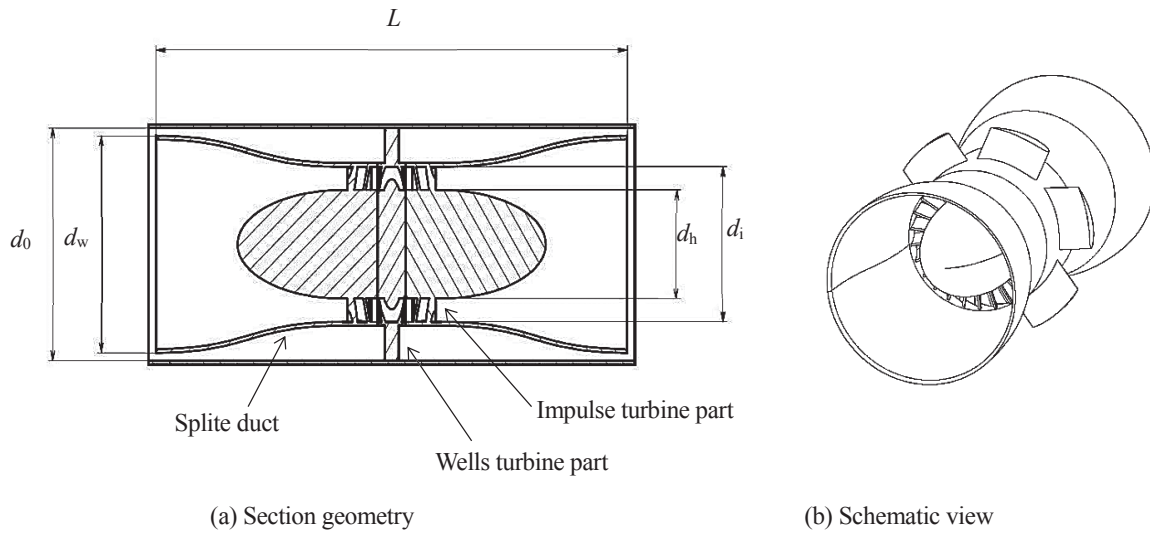


Fig.1 Double cascade turbine

タービン上流からダクト内を流速 $V_0$ の流体が近づき、仕切りダクトによってウェルズタービン部と衝動タービン部に分かれる。それぞれの流量を $Q_w, Q_i$ とする。仕切りダクトからの流れは、それぞれの流路断面積に応じて流速が変化し羽根車に入る。仕切りダクトの形状は図1のように、流入部直径 $d_w$ からタービン部直径 $d_i$ へ緩やかに変化する形状となっている。仕切りダクト直径および設計流量は、ウェルズタービン部と衝動タービン部の最大効率を得る流量係数 $\phi_w, \phi_i$ をもとに算出した。二重翼列タービンの流量 $Q_0$ は、ウェルズタービンと衝動タービンのそれぞれへ流れる流量を $Q_w, Q_i$ とすると、 $Q_0=Q_w+Q_i$ である。仕切りダクト入口では、一様な速度 $V_0$ で流れ、それぞれのタービン部分に流入するときに速度 $V_w, V_i$ になるとすると、それぞれの部分の流量について、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 Q_0 &= \frac{\pi}{4} d_0^2 \cdot V_0 \\
 Q_w &= \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_w^2) \cdot V_0 = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_i^2) \cdot V_w \\
 Q_i &= \frac{\pi}{4} d_w^2 \cdot V_0 = \frac{\pi}{4} (d_i^2 - d_h^2) \cdot V_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、二重翼列タービン全体、ウェルズタービン、衝動タービンの流量係数 $\phi, \phi_w, \phi_i$ を次式で定義する。

$$\phi = \frac{V_0}{U_0} \quad \phi_w = \frac{V_w}{U_w} \quad \phi_i = \frac{V_i}{U_i} \tag{2}$$

また,  $U_0=U_w=R_0\omega$  でタービン外周における周速度,  $U_i=R_i\omega$  は衝動タービンの外周における周速度である.  
式 (1) と式 (2) から, 二重翼列タービンの設計流量係数  $\phi$  を得る.

$$d_0^2 \cdot \phi = (d_0^2 - d_i^2) \phi_w + (d_i^2 - d_h^2) \phi_i \frac{d_i}{d_0} \quad (3)$$

一方, 仕切りダクト直径は, 式 (1) のウェルズタービン部の関係から次式を得る.

$$d_w^2 = d_0^2 - (d_0^2 - d_i^2) \frac{\phi_w}{\phi} \quad (4)$$

また, 効率  $\eta$  は次式となる.

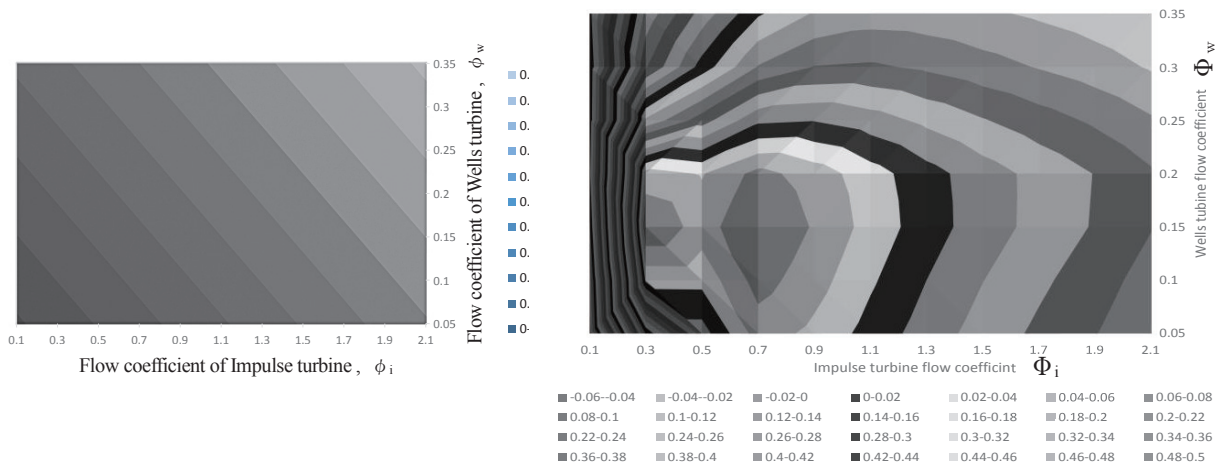
$$\eta = \frac{T_0 \cdot \omega}{\Delta P \cdot Q_0} = \frac{(T_w + T_i) \cdot \omega}{\Delta P \cdot (Q_w + Q_i)} = \frac{C_{T_w} \cdot A_w + C_{T_i} \cdot A_i \cdot (d_i/d_0)^3}{C_{T_w} \cdot A_w \cdot \eta_i + C_{T_i} \cdot A_i \cdot (d_i/d_0)^3 \cdot \eta_w} \cdot \eta_i \cdot \eta_w \quad (5)$$

ここで,  $T_0$  は二重翼列タービンにかかるトルク,  $\Delta P$  は全圧差である.  $C_T$  はトルク係数である.

ウェルズタービンと衝動タービンのそれぞれの最高効率を得る流量係数をもとに, 二重翼列タービンの形状および設計流量を設定した. 図 2 はウェルズタービンと衝動タービンの特性をもとに, 二重翼列タービンの特性を式 (1) と式 (5) から求めたものである. 図 2(a) は二重翼列タービンの流量係数  $\phi$  のマップであるが, ウェルズタービンの流量係数  $\phi_w$  を最高効率付近の 0.05 から 0.35 に変化させた場合, 衝動タービンの流量係数  $\phi_i$  を大きく変化させても ( $\phi_i=0.1 \sim 2.1$ ), 二重翼列タービンの流量係数  $\phi$  は, たかだか 0.5 程度までに抑えられる. また, 図 2(b) の効率のマップにおいては,  $\phi_i=0.7$  付近  $\phi_w=0.15$  付近で, 最大効率 0.5 弱となっている. このときの流量係数は,  $\phi=0.19$  である. その結果をもとに, 仕切りダクトの直径  $d_w$  を式(4)より設定した.

## 2・2 シミュレーション条件

シミュレーションはそれぞれ 1 ピッチについて行い, 上流, 下流に十分長い直線管路を設定した. 流入速度  $V_{in}$  は 15 m/s の一定流速として, 流出部を 0 Pa とした. タービンの回転速度を変化させて, タービン性能を評価した. タービンは 1 ピッチの解析を行なった. 乱流モデルは SST で, メッシュは, 図 3 に示すように羽根表面にインフレーションを設定して, テトラメッシュをウェルズタービン部が 121988 で, 衝動タービン部が 102430, 全体で 394721 である.



(a) Flow coefficient of double turbine

(b) Estimation of efficiency of double turbine

Fig.2 Flow coefficient and efficiency map of double cascade turbine with wells and impulse turbine

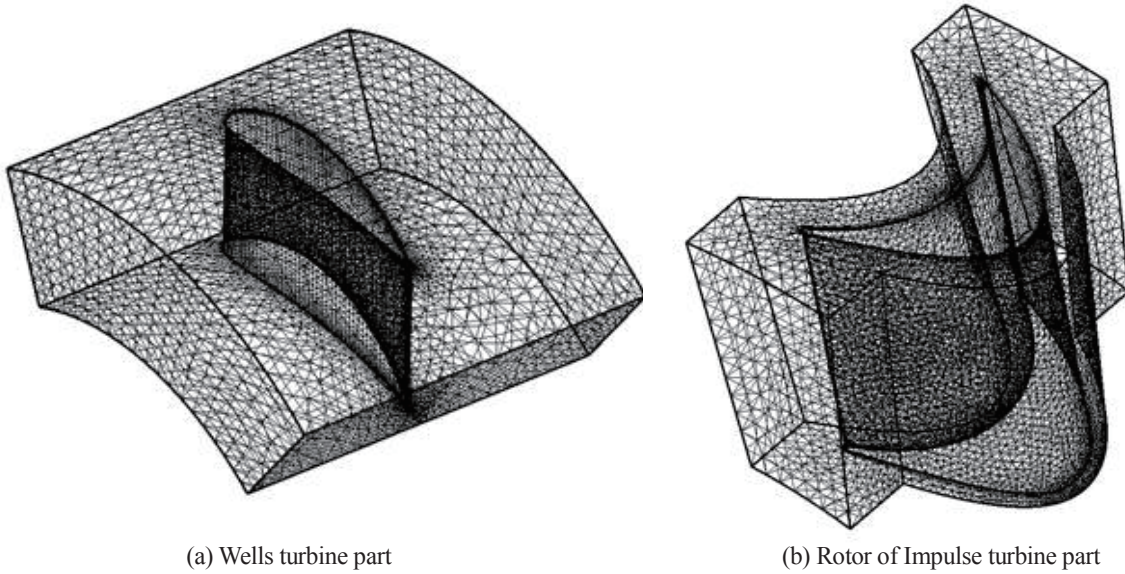


Fig. 3 Sketch of mesh of turbine rotor

### 2・3 タービンの性能評価方法

性能の評価のために用いている流量係数 $\phi$ , トルク係数 $C_T$ , 効率 $\eta$ , 入力エネルギー係数 $C_{in}$ の定義式は,

$$\phi = \frac{V}{R\omega} \quad C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 AR} \quad \eta = \frac{T\omega}{\Delta P \cdot Q} \quad C_{in} = \frac{\Delta P \cdot Q}{\frac{1}{2}\rho U^2 AU} \quad (6)$$

ここで,  $V$ ,  $R$ ,  $\omega$ は軸方向流入速度, ローター半径, ローターの角速度,  $T$ ,  $U$ はタービンにかかるトルク, 翼端周速度を示し,  $\Delta P$ はタービン全圧差,  $A(=blN)$ は羽根面積である.

## 3. 解析結果

### 3・1 性能特性

図4は, 効率の流量係数による変化を示している. 実線は, 二重翼列タービンであり, 比較のために同じ形状のウェルズタービンと衝動タービンの効率を示している. 今回参考としたウェルズタービンは流量係数がおよそ0.1で最大効率0.65程度を示し, 流量係数の増加とともに急激に効率が低下している. 衝動タービンは流量係数が0.6から0.8の間で最大効率が0.43となり, それより流量係数の増加とともに, 緩やかに低下している. 一方, 二重翼列タービンでは, 流量係数が0.2付近で最大効率0.45を示し, それより流量係数が増加するにつれて, 緩やかに低下している. 二重翼列タービンは, ウェルズタービン型に近いところに最高効率があり, 流量係数の増加とともに, 衝動タービンのように効率が緩やかに低下する特性を有している. このことから, 二重翼列タービンもウェルズタービンのように高速型で, かつ衝動タービンのように高流量側において効率の流量による変化も緩やかで, 発電に有利であるといえる.

図5は, 二重翼列タービンの全体効率と各部の効率の関係を示している. 図中の破線(▲印)はウェルズタービン部分の効率特性であるが, 図4のウェルズタービンと比較すると, 二重翼列タービンに組み込むことで効率が大幅に低下していることがわかる. 一方, 衝動タービン部分は最高効率はほとんど変わらず, 二重翼列にしたことによる変化はあまり見られない. ただ, 流量係数が大きいところでの効率の低下が, 若干大きくなっている. それぞれの性能を受けて, 二重翼列タービンの最大効率が0.45程度に収まっている. また, 各タービンの最高効率を示す流量係数が, ウェルズタービンでは若干低流量側へ移動し, 衝動タービンでは0.25付近まで流量係数を小さくすることができている. しかし, まだ両タービンの最高効率の流量係数が一致していない.

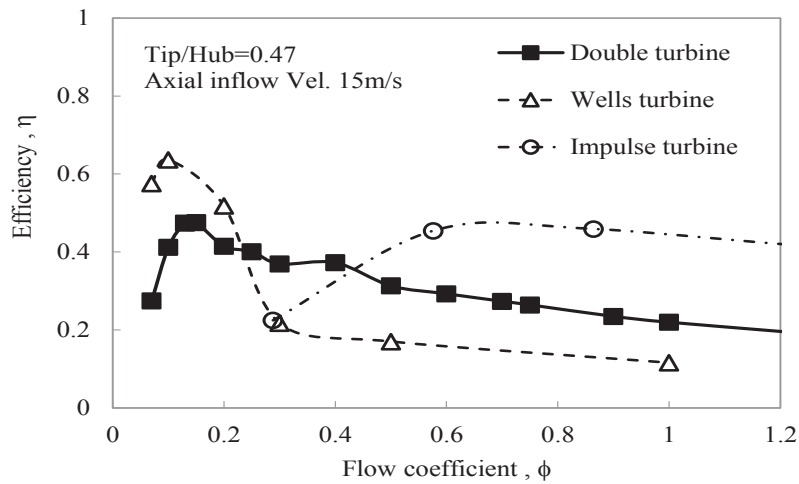


Fig. 4 Variation of Turbine efficiency with flow coefficient for Double, Wells and Impulse turbines

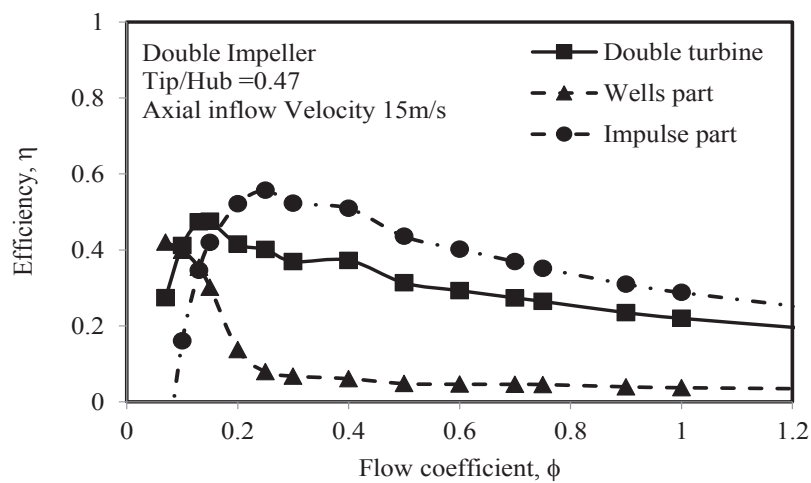


Fig. 5 Variation of Turbine efficiency with flow coefficient for Double turbine

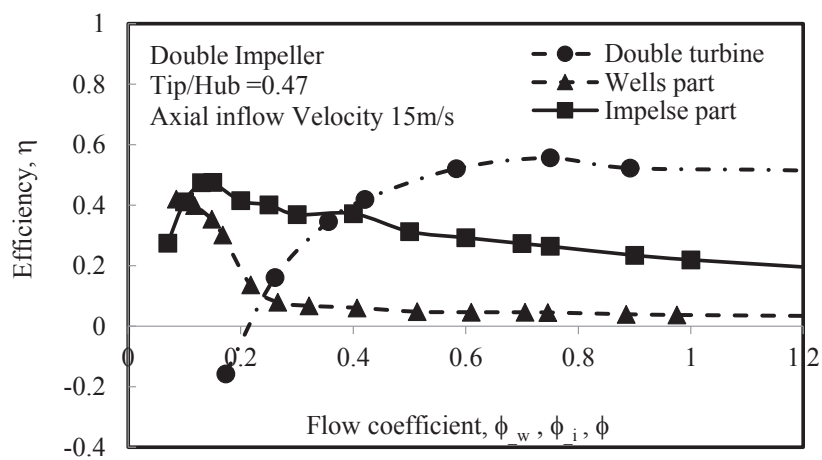
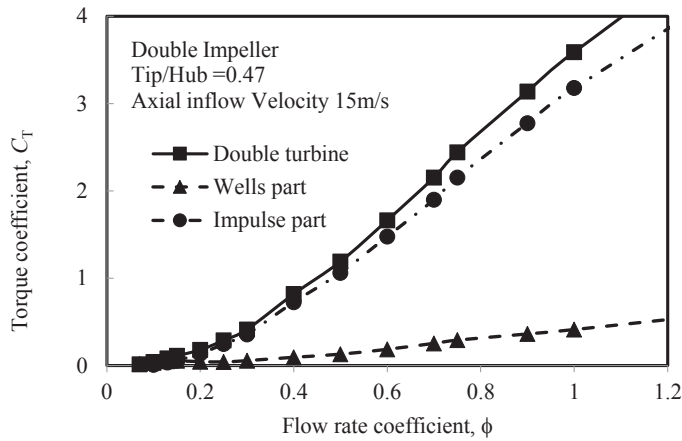
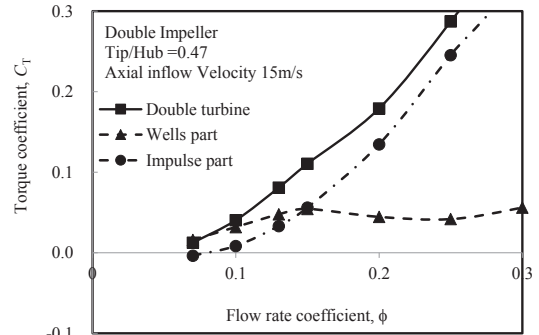


Fig. 6 Variation of Turbine efficiency with flow coefficient of each part



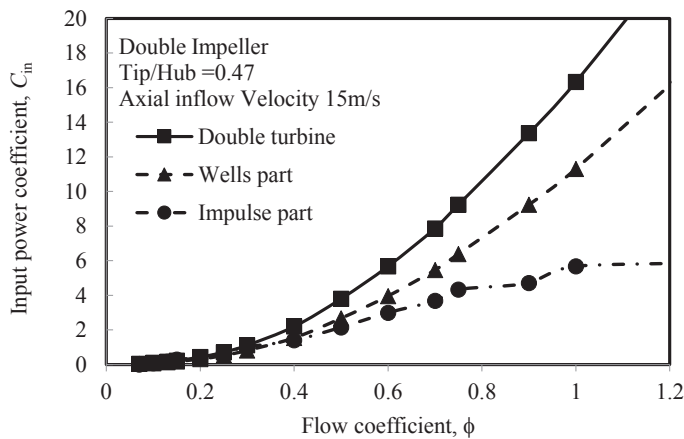


(a) General variation of Torque coefficient

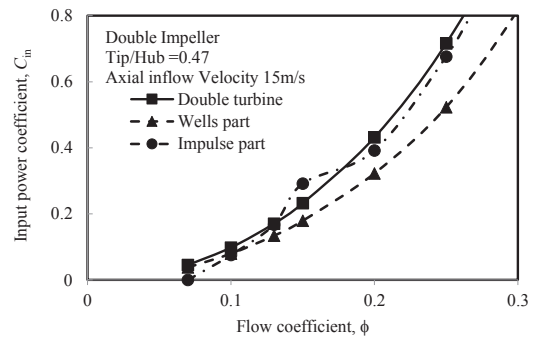


(b) Partial Variation of Torque coefficient

Fig. 7 Variation of Torque coefficient with flow coefficient of each part



(a) General variation of Input power coefficient



(b) Partial Variation of Input power coefficient

Fig. 8 Variation of input power coefficient with flow coefficient of each part

図8は入力エネルギー係数の流量係数による変化を示している。二重翼列タービンは、ウェルズタービンと同様に入力エネルギー係数が、流量係数の増加とともに増加している。入力係数は、流量係数が大きいところでは、衝動タービン部よりウェルズタービン部が大きくなっているが、ウェルズタービン部は大流量で効率が低く、入力エネルギーを有効に利用できていない。しかし、二重翼列タービンでは、流量係数が大きいところにおいても、効率の低下が少なくウェルズタービンより良好である。一方、図8(b)に示す低流量では、衝動タービンの方が入力はウェルズタービンの部分より大きくなる。

図9はタービン前後の全圧差の流量による変化を示している。図9(a)では流量係数の増加に伴って、全圧差が増加している。また、二重翼列の全圧係数が衝動タービンのものとほぼ等しいことがわかる。一方、ウェルズタービンの全圧差はかなり小さい。ウェルズタービンの全圧差には仕切りダクト部分は含まれないため、図9(b)に示すように、低流量係数のところでもウェルズタービン部の全圧差が小さい。このことは、仕切りダクトにおける全圧の低下すなわち損失がかなり大きいことを示すものである。このことが、図5で示したようにウェルズタービン部の効率が単独のウェルズタービンの場合に比べて大きく低下している原因である。

図10はウェルズタービン部と衝動タービン部のそれぞれの流量の比  $Q_w/Q_i$  の全体流量係数に対する変化を示している。設計では、流量比、それぞれのタービンの最高効率を示す流量係数の割合から決まるものであるが、ウェルズタービンが高速度型であるため、流入流量は衝動タービン部に比べかなり少なく、流量係数  $\phi$  で変化せず  $Q_w/Q_i=0.14$  と一定となっている。設定していることを示す。しかしながら、実際の流量比では図中●印のよ

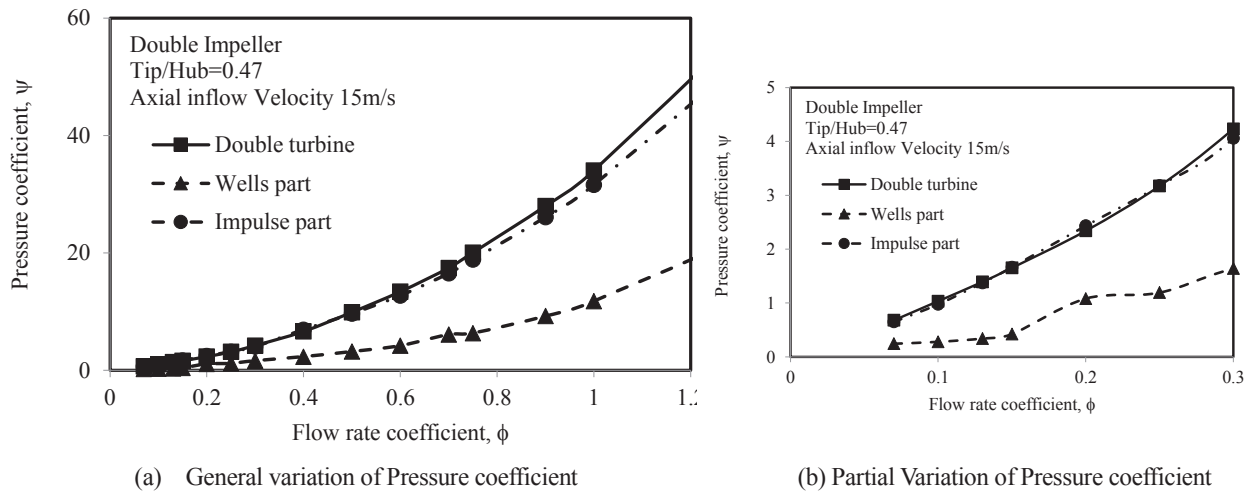


Fig. 9 Variation of input power coefficient with flow coefficient of each part

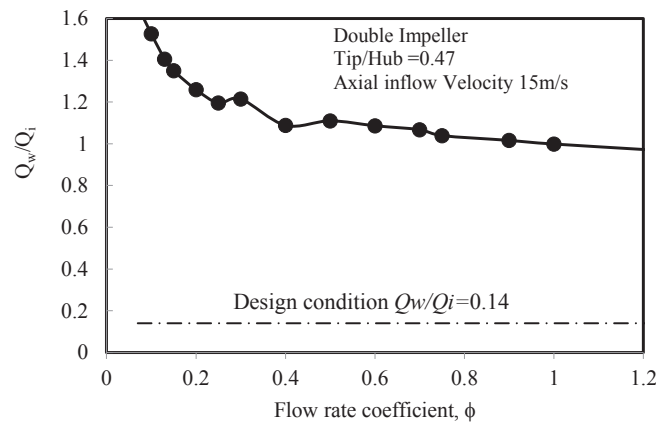


Fig. 10 Variation of flow rate ratio of Wells and Impulse parts

うにいずれの流量係数においても  $Q_w/Q_i > 1.0$  となっており、設計とは大きくかけ離れてウェルズタービン部のほうに多く流れている。特に、低流量係数のウェルズタービンの性能が本来良いところで、ウェルズタービンへの流量が増大しており、設計との違いが顕著になっている。このような、流量比の大幅な違いが、ウェルズタービン部の性能低下を招き、二重翼列タービンの性能向上を妨げた原因と考えられる。

### 3・2 内部流動

図 11 に二重翼列タービンの仕切りダクト入口付近の流線の分布を示している。図 11(a)の最高効率付近の低流量係数における分布では、仕切りダクトに近づく流れがウェルズタービン部と衝動タービン部にスムーズに分かれるのではなく、衝動タービン部に流れるべき流線が大きく曲がって、ウェルズタービン部へ流れ込んでいる様子が明確である。このために、図 10 に示したように、ウェルズタービンの流量が著しく増加して、衝動タービンの流量が減少し流量比  $Q_w/Q_i$  が設計とは異なる大きな値を取った。さらに、仕切りダクトの全圧の大きな低下を招いたのである。図 11(b)の流量係数が高い場合も同様な傾向を示すものの、わずかではあるが衝動タービン部への流れが大きくなっている。このように、ウェルズタービン部へ流量が多く流れるのは、図 9 に示すように、ウェルズタービン部の全圧係数が衝動タービン部に比べ小さく、流れやすくなっていることによるものである。

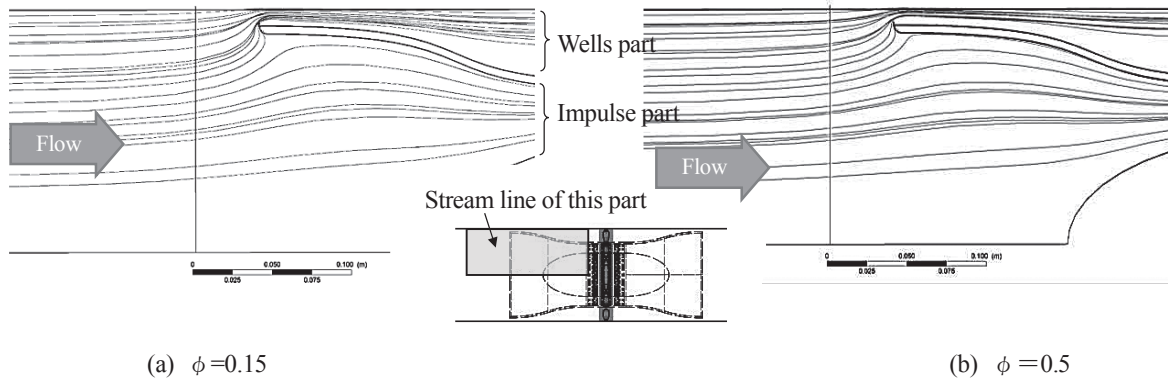


Fig. 11 Stream line distributions near inlet of split duct

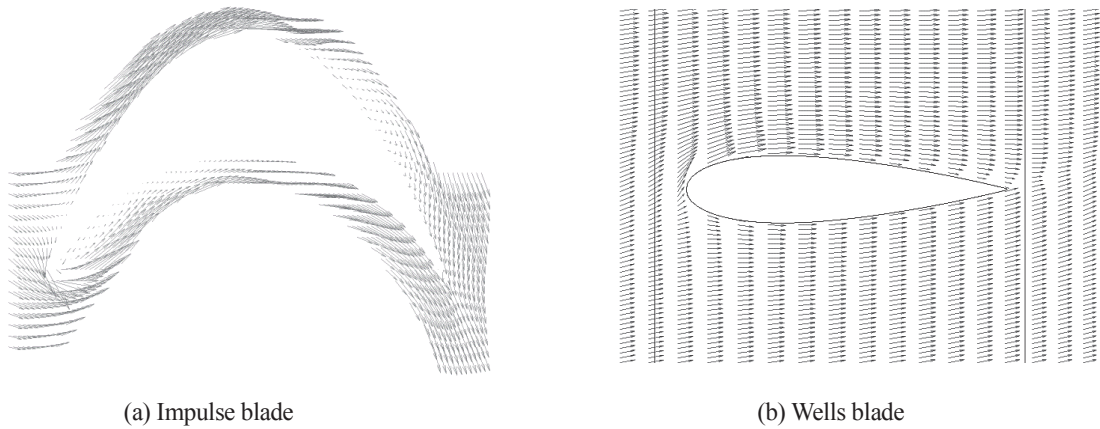
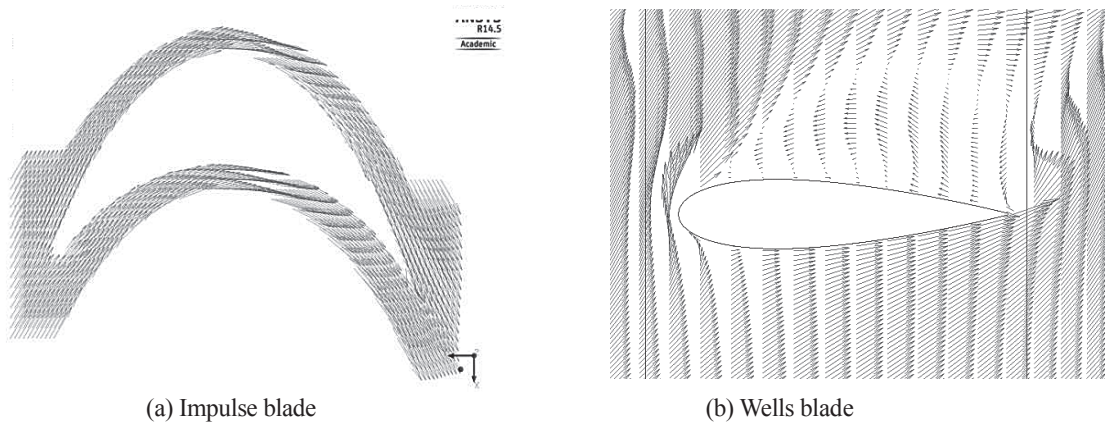
Fig. 12 Velocity vector map around blades at  $\phi = 0.1$ Fig. 13 Velocity vector map around blades at  $\phi = 0.5$ 

図 13 は流量係数 0.5 における翼まわりの相対流れのベクトル線図である。図 12(a)の衝動タービンでは、最高効率より大流量であるが、効率低下が少なく良好な流量係数の場合である。流入部も翼の入口に沿ったスムーズな流れとなり、翼間流れの後半においても翼に沿った良好な流れとなっている。一方、図 13(b)は効率が大きく低下した大流量での流れであるが、この場合の流入角は  $40^\circ$  程度と非常に大きくなっている。そのために、翼前縁付近から流れのはく離が発生して、翼負圧面側には大きな逆流領域が形成されている。このように、ウェル



ズタービンでは、設計流量から離れた流量に置ける流れの悪化が著しい。したがって、二重翼列タービンでは、ウェルズタービンにおける性能を中心に設計を進めることが重要である。

## 5. まとめ

本研究で、ウェルズタービンと衝動タービンからなる二重翼列タービンを提案し、その性能に関して、以下のことがわかった。

1. 今回提案した二重翼列タービンの効率は、衝動タービンの効率程度とあまり良好ではなかったが、衝動タービンより低流量で得られ、また流量の増加による効率の低下を衝動タービンのように緩やかに抑えることができた。
2. ウェルズタービン部の効率が低くなり、これが二重翼列タービンの最高効率の低下を招いた。
3. トルク特性は衝動タービンと同様に流量係数の増加に伴い大きくなる傾向が見られ、始動特性が良好である。
4. 仕切りダクトまわりの流れは、設計と異なりウェルズタービン部へ多くの流量が流れる。衝動タービンに比べ、ウェルズタービンでは全圧低下が少なく、流れやすい形状となっているために仕切りダクトへの流れ込みが大きくなった。

## 文 献

- (1) 高尾 学, 瀬戸口俊明, 奥原真哉, 三次元形状翼を有するウェルズタービン, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 0915, 361-362(2012.11.17-18)
- (2) Ahmed S. Shehata, Khalid M. Saqr, Qing Xiao, Mohamed F. Shehadeh, Alexander Day, Performance analysis of wells turbine blades using the entropy generation minimization method, Renewable Energy, 86, pp1123-1133 (2016)
- (3) Ralf Starzmann and Thomas Carolus, Model-based selection of full-scale Wells turbines for ocean wave energy conversion and prediction of their aerodynamic and acoustic performances, Proc IMechE Part A: J Power and Energy 228(1), pp 1-16(2016)
- (4) 鈴木正己, 荒川忠一, ウェルズタービン翼形状による流れ場への影響, ターボ機械, 35(2), pp 24-29(2007)
- (5) M. Torresi, S.M.Camporeale, G. Pascasio, Detailed CFD Analysis of the Steady Flow in a Wells Turbine Under Incipient and Deep Stall Conditions, Journal of Fluids Engineering, Vol. 131, 071103-1-17(2009)
- (6) M.H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, D. Thévenin, Multi-objective optimization of the aerofoil shape of Wells turbine used for wave energy conversion, Energy 36, pp 438-446(2011)
- (7) S. Shaaban, A. Abdel Hafiz, Effect of duct geometry on Wells turbine performance, Energy Conversion and Management 61, pp 51-58(2012)
- (8) A. Thakker and R. Abdulhadi, Effect of Blade Profile on the Performance of Wells Turbine under Unidirectional Sinusoidal and Real Sea Flow Conditions, International Journal of Rotating Machinery, 2007, ID51598, pp 1-8(2007)
- (9) 瀬戸口俊明, 高尾学, 木上洋一, 金子賢二, 井上雅弘, 波力発電用衝動タービンに関する研究, 日本機械学会論文集 (B), 65 巻 629 号, pp 255-261(19991)
- (10) 高尾学, 鈴木正己, 佐藤栄治, 永田修一, 豊田和隆, 瀬戸口俊明, 波力発電用衝動タービンの実海域試験, ターボ機械, 36-12, pp 766-772 (2008)
- (11) Ajit Thakker, Zia Usmani, T.S. Dhanasekaran, Effects of turbine damping on performance of an impulse turbine for wave energy conversion under different sea conditions using numerical simulation techniques, Renewable Energy 29, pp 2133-2151 (2004)
- (12) Bruno Pereiras, Francisco Castro, Abdelatif el Marjani, Miguel A. Rodríguez, An improved radial impulse turbine for OWC, Renewable Energy, 36, pp1477-1484(2011)
- (13) António F. O. Falcão, João C. C. Henriques, Luís M.C. Gato, Rui P. F. Gomes, Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter, Ocean Engineering, 75, 148-156(2014)